

# 湖相碳酸盐岩储集层测井识别方法及应用: 以桑托斯盆地 A 油田白垩系 BVE 组为例<sup>\*</sup>

张 梅<sup>1,2</sup> 王贵文<sup>1,2</sup> 赖 锦<sup>1,2</sup> 庞小娇<sup>1,2</sup> 杨 柳<sup>3</sup>

1 油气资源与工程全国重点实验室, 中国石油大学(北京), 北京 102249

2 中国石油大学(北京)地球科学学院, 北京 102249

3 中国石油杭州地质研究院, 浙江杭州 310023

**摘要** 巴西桑托斯盆地盐下层系具有十分丰富的油气资源, 白垩系 BVE 组湖相碳酸盐岩作为研究的重点与难点, 在盐下区块的构造演化、沉积充填及油气成藏特征和富集规律方面已取得显著成果。由于 BVE 组湖相碳酸盐岩储集层储集空间复杂、非均质性强导致储集层精细表征难, 制约了非常规油气的勘探开发进展。与常规测井相比, 电成像测井更能直观地识别与评价非均质碳酸盐岩储集层, 可在图像上快速识别出溶蚀孔和裂缝。基于岩心、薄片等地质资料, 结合常规、电成像及核磁共振测井资料, 归纳总结了该区块白垩系 BVE 组湖相碳酸盐岩储集层的储集空间类型, 在此基础上将储集层划分为孔隙型、裂缝-溶孔型和裂缝型 3 类。利用岩心刻度常规、电成像测井资料建立了桑托斯盆地 BVE 组不同类型储集层测井识别图版, 并完成单井纵向上储集层类型的连续识别和划分。桑托斯盆地盐下 BVE 组储层的测井表征有助于完善盐下碳酸盐岩储层测井评价体系, 为盐下碳酸盐岩储层的高效开发提供理论指导和技术支撑。

**关键词** 桑托斯盆地 BVE 组 湖相碳酸盐岩储集层 测井精细表征

**第一作者简介** 张梅, 女, 1997 年生, 硕士研究生, 研究方向为层序地层学和测井地质学。E-mail: zhangmei19971203@163.com。

**通讯作者简介** 王贵文, 男, 1966 年生, 教授, 博士生导师, 从事沉积储集层与测井地质学方面的教学与科研工作。E-mail: wanggw@cup.edu.cn。

**中图分类号:** P531 **文献标志码:** A

## Logging identification method and application of lacustrine carbonate reservoir: an example of BVE Formation in A oilfield of Santos Basin

ZHANG Mei<sup>1,2</sup> WANG Guiwen<sup>1,2</sup> LAI Jin<sup>1,2</sup> PANG Xiaojiao<sup>1,2</sup> YANG Liu<sup>3</sup>

1 National Key Laboratory of Petroleum Resources and Prospecting, China University of Petroleum (Beijing), Beijing 102249, China

2 College of Geosciences, China University of Petroleum (Beijing), Beijing 102249, China

3 Hangzhou Institute of Geology, PetroChina, Hangzhou 310023, China

**Abstract** Hydrocarbon resources of the pre-salt reservoir in Santos Basin, Brazil shows good pros-

\* 中国石油天然气股份有限公司项目(编号: 2021DJ2403)和中国石油大学(北京)科研基金(编号: 2462024XKBH009)联合资助。  
[Co-funded by the Key Technology Research Project of Overseas of PetroChina Ltd (No. 2021DJ2403) and Scientific Fundation of China University of Petroleum Beijing (No. 2462024XKBH009)]

pect. Many researchers have been focused on the Cretaceous carbonate of the BVE Formation. A lot of research works have been done in structural evolution, sedimentary, and oil and gas accumulation, and so on. However, due to the complex reservoir spaces and strong heterogeneity, well logging evaluation is challenging, which in turn restricts the advancement in oil and gas exploration and development in this area. Compared to conventional logs, electrical imaging logging offers a more intuitive approach for identifying and evaluating heterogeneous carbonate reservoirs, particularly in the rapid detection of dissolution pores and fractures. In our study, experimental data, including cores and slices, and conventional log, as well as electrical imaging logging and nuclear magnetic resonance log are integrated to analyze the reservoir space types. The reservoirs are classified into three types: porous reservoir, fracture-dissolution pore reservoir, and fracture reservoir. The identification standards of these types of reservoirs using well logs are established. Therefore, the reservoir types can be divided in a single well. This study hopes to improve the logging evaluation system of the pre-salt carbonate reservoirs, and provides guidance for highly effective reservoir development of carbonate reservoirs.

**Key words** Santos Basin, Barra Velha Formation, lacustrine carbonate reservoir, logging characteristics

**About the first author** ZHANG Mei, born in 1997, is a masteral candidate. She is interest in sequence stratigraphy and well logging geology. E-mail: zhangmei19971203@163.com.

**About the corresponding author** WANG Guiwen, born in 1966, is a professor and doctoral supervisor. He is mainly engaged in sedimentology, reservoir geology and well logging geology. E-mail: wanggw@cup.edu.cn.

碳酸盐岩储集层是世界各国产出油气总产量占比最高的储集层,具有储量规模大、产量高等特点(范嘉松, 2005)。碳酸盐岩根据成因的不同可分为海相、湖相和沼泽相。近年来大量开采的湖相碳酸盐岩油气藏使其一跃成为碳酸盐储集层勘探开发的焦点(金振奎等, 2013; 刘震等, 2022)。湖相碳酸盐岩作为分布最广泛的一类陆相碳酸盐岩,可以通过“自生自储”的方式实现有效成藏,为石油勘探和开发提供了新思路。

巴西国家石油公司自2007年在南大西洋桑托斯盆地和坎波斯盆地发现石油并生产了超过500亿桶原油,使得几千米厚的白垩纪盐封引起全世界关注,而巴西桑托斯盆地是盐下领域油气最富集的盆地,也是国内外学者的研究热点,其中白垩系BVE组湖相碳酸盐岩储集层是近几十年来发现的主要油气区,资源前景广阔(汪新伟等, 2013; Herlinger *et al.*, 2017; Kattah, 2017; 贾怀存等, 2021; Wang *et al.*, 2023)。前期研究重点主要集中在盐下区块的构造演化、沉积充填及油气成藏特征和富集规律(何娟等, 2011; 熊利平等, 2013; 邓超等, 2014; 苏玲等, 2017; 康洪全等, 2018a),但由于白垩系BVE组湖

相碳酸盐岩储集层储集空间复杂、非均质性强,在储集层精细表征方面研究薄弱,一定程度上制约了该研究区油气田勘探进程。储集层分类是精细油藏描述的重要内容之一,是油田开发后期调整和潜力分析的关键,研究区白垩系BVE组储集层取心少,亟需借助测井资料开展储集层类型的连续精细识别和刻画,进而展开储集层分布研究,为优质储集层和甜点预测奠定基础。

碳酸盐岩储集层分类评价方法较多,利用岩心、薄片和常规测井资料是储集层识别与评价的常用手段(徐星和赵万优, 2001; 景建恩等, 2005; 赵永刚等, 2008; 陈芳等, 2010; 徐敬领等, 2012)。利用取心井进行岩心精细描述不仅时间和经济成本高,而且难以展开区域性研究。常规测井虽能够实现单井纵向的储集层属性的连续表征,但受纵向分辨率影响对于强非均质性储集层难以开展精细研究。高分辨率成像测井能够获得井周360°伪地质图像,针对湖相碳酸盐岩储集层,实现成像进行孔隙类型划分、刻画孔洞形态和连通性孔隙度构成分析,其纵向识别精度可达5 mm,有利于碳酸盐岩储集层评价。以桑托斯盆地A油田白垩系

BVE 组湖相碳酸盐岩储集层为例, 基于岩心、薄片等地质资料, 以斯伦贝谢研制的油基钻井液高分辨率 FMI-HD 测井为主要技术手段, 归纳总结了白垩系 BVE 组湖相碳酸盐岩储集层的储集空间类型, 并根据储集空间的不同和组合方式划分出孔隙型、裂缝-孔隙型和裂缝型 3 种储集层类型, 最终建立“常规+成像+岩心+地质模式”的储集层类型典型识别图版, 首次实现桑托斯盆地白垩系 BVE 组储集层的单井纵向连续识别与划分。辅以斯伦贝谢 CMR 核磁共振测井  $T_2$  谱的处理与解释, 大大提高了研究区储集层的单井纵向连续识别的精度。明确桑托斯盆地白垩系 BVE 组主要发育孔隙型储集层, 不同储集层类型测井识别图版的建立为碳酸盐岩储集层的精细评价和优质储集层预测提供指导。

## 1 地质概况

桑托斯盆地位于巴西东南部边缘, 北部与坎波斯盆地的 Cabofrio 高地相邻, 南部与佩洛斯盆地的 Florianopolis 高地接壤, 其面积约为  $35 \times 10^4 \text{ km}^2$ , 是巴西最大的沉积盆地之一 (Meisling *et al.*, 2001; de Andrade *et al.*, 2019)。桑托斯盆地为典型的被动大陆边缘盆地, 是从小地堑和广阔的潟湖和湖泊演变而来, 与早白垩世冈瓦纳超大陆的断裂和大西洋进一步发展有关 (Quirk *et al.*, 2013; de Paula Faria *et al.*, 2017)。该盆地整个构造演化和沉积充填经历了早白垩世裂谷阶段、早白垩世 Aptian 阶过渡阶段和晚白垩世-新生代漂移阶段 3 个阶段, 白垩纪过渡期形成的厚盐层将盐上和盐下 2 套油气系统分开, 盐上层段为海相碳酸盐岩储集层, 盐下层段为湖相碳酸盐岩储集层。整体呈北东-南西走向, 依次发育西部坳陷带、西部隆起带、中央坳陷带、东部隆起带和东部坳陷带 (图 1) (康洪全等, 2018b; Vasquez *et al.*, 2019)。

桑托斯盆地盐下湖相碳酸盐岩发育完美的生储盖组合, 盆地底部是坚硬的火山岩基底, 生油层以 I 型干酪根为代表的黑色页岩为主, 上覆沉积岩包括碳酸盐岩、膏岩及盐岩分别作为储集层与盖层。研究区下白垩统共发育 5 套地层, 从老到新分别为 Camboriu 组、Picarras 组、Itapema 组、Barra Velha 组和 Ariri 组, 其中 BVE 组的湖相碳酸盐岩储集层是近年来桑托斯盆地盐下重大油气发现中的主要储集层。

## 2 储集层特征及分类

### 2.1 岩石学特征

根据前人研究, 巴西桑托斯盆地白垩系 BVE 组盐下湖相碳酸盐岩主要为灰岩沉积, 参考国内外典型的碳酸盐岩划分方案, 同时结合巴西国家石油公司目前的分类方案, 以易区分和识别为原则, 按照成因、支撑类型、结构组分含量将白垩系 BVE 组的岩石类型划分为原始组分 (泥晶灰岩、粘结灰岩)、高能改造组分 (泥粒灰岩、颗粒灰岩) 及与碳酸盐岩相关的交代成因岩 (白云岩、硅质岩)。笔者共收集研究区 1-SPS-1 井等 19 口勘探井白垩系 BVE 组岩心 337.9 m, 柱塞样 316 块, 磨制薄片 1769 张, 通过岩心观察和薄片鉴定明确了 BVE 组主要岩性为颗粒灰岩, 其次为粘结灰岩。其中, 丛晶、枝晶粘结灰岩代表其沉积水体能量较高, 粒间孔较为发育, 孔渗性较高, 可作为优质储集层, 属典型的孔隙型储集层。泥晶灰岩的出现反映正常碳酸盐岩化学沉淀过程且水体能量较低, 基本无储集空间。桑托斯盆地盐下 BVE 组湖相碳酸盐岩储集空间主要包括生长过程中形成的粒间孔, 其次为颗粒及基质遭受溶蚀形成的溶孔及裂缝 (图 2)。

### 2.2 储集层物性特征

储集层沉积时期, 水体能量较强, 储集层原生孔隙发育, 较高的古地貌使得后期地层暴露遭受淡水淋滤作用, 原生孔隙得以保存。研究区经历了同生期暴露的淡水淋滤作用和成岩中晚期的埋藏溶蚀作用, 早期原生孔隙为埋藏溶蚀期溶蚀性流体提供了运移通道, 有效抑制了胶结作用, 形成了具有良好物性的碳酸盐岩储集层 (武静等, 2019)。白垩系 BVE 组部分岩心平均孔隙度为 11.48%, 平均渗透率为  $61.3 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ , 表明碳酸盐岩储集层基质具有中-高孔渗的特征。图 3 为桑托斯盆地盐下 BVE 组湖相碳酸盐岩储集层孔隙度-渗透率交会图: 孔隙度和渗透率具有较好的相关性, 二者呈正相关趋势。裂缝的存在连通了孤立孔隙, 使得储集层在孔隙度较小时仍出现较高的渗透率。研究区储集层基质孔隙发育, 但存在较强的非均质性, 局部发育裂缝和溶蚀孔洞的地方可形成优质储集层。

### 2.3 储集层类型

根据岩心和薄片资料分析表明: 桑托斯盆地盐

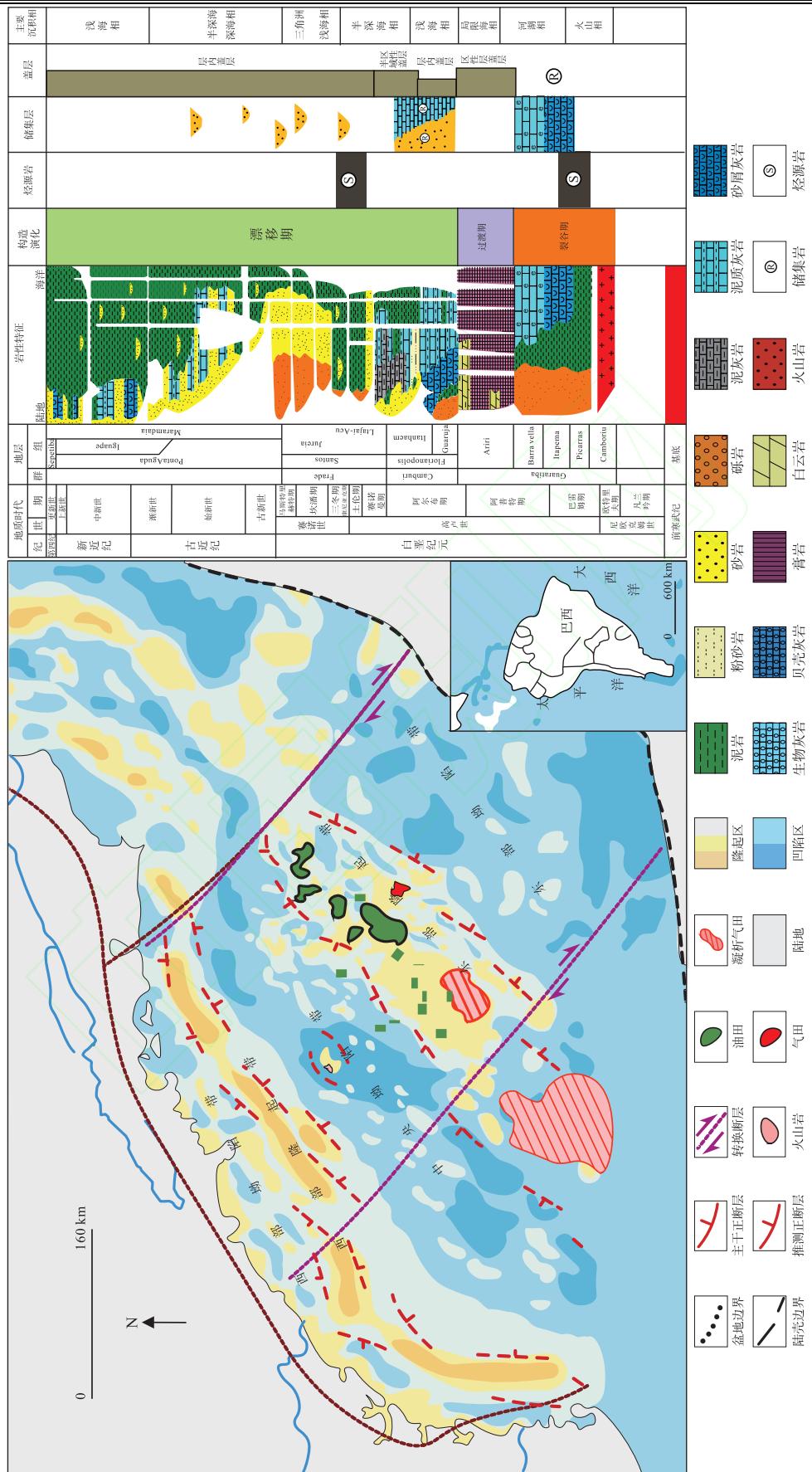
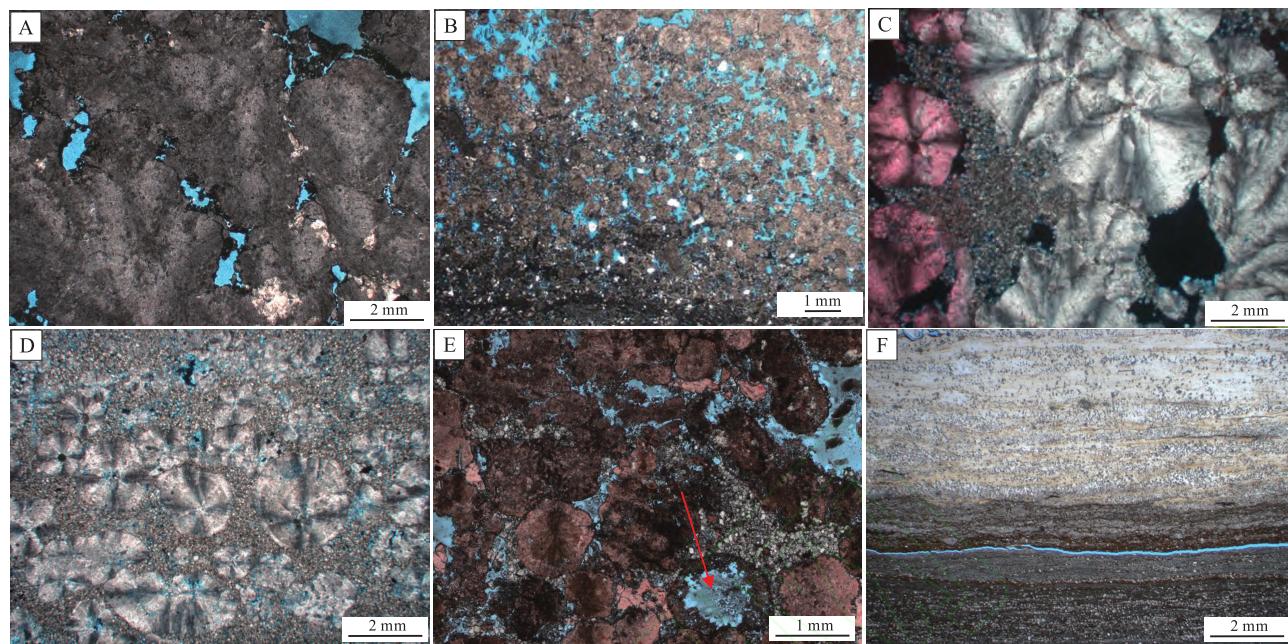


图1 桑托斯盆地地质概况图(据康洪全等,2018b)  
Fig.1 Geological map of Santos Basin (after Kang et al., 2018b)

Fig.



A—2-RJS-1 井, 5432 m, 枝晶粘结灰岩, 粒间孔隙较发育; B—2-RJS-1 井, 5611 m, 亮晶砂屑灰岩, 粒间孔隙发育; C—9-RJS-4 井, 5502 m, 球晶粘结灰岩, 部分球晶粘结灰岩成群出现, 可见粒间溶蚀孔; D—9-RJS-4 井, 5432 m, 球晶粘结灰岩, 部分颗粒发生挤压变形, 可见粒间溶蚀和粒内溶蚀孔; E—1-RJS-16 井, 5076.2 m, 球晶粘结灰岩, 粒内溶孔; F—9-Ata-12 井, 5673.5 m, 泥晶灰岩, 构造缝

图 2 桑托斯盆地白垩系 BVE 组储集层岩心与薄片特征

Fig. 2 Core and thin section characteristics of the Cretaceous BVE Formation reservoir in Santos Basin

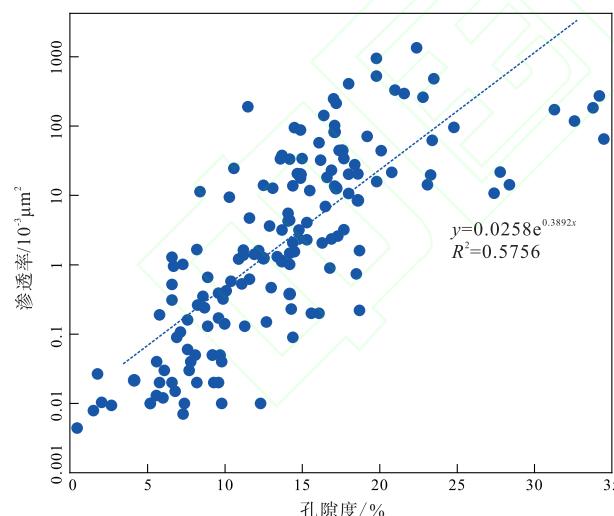


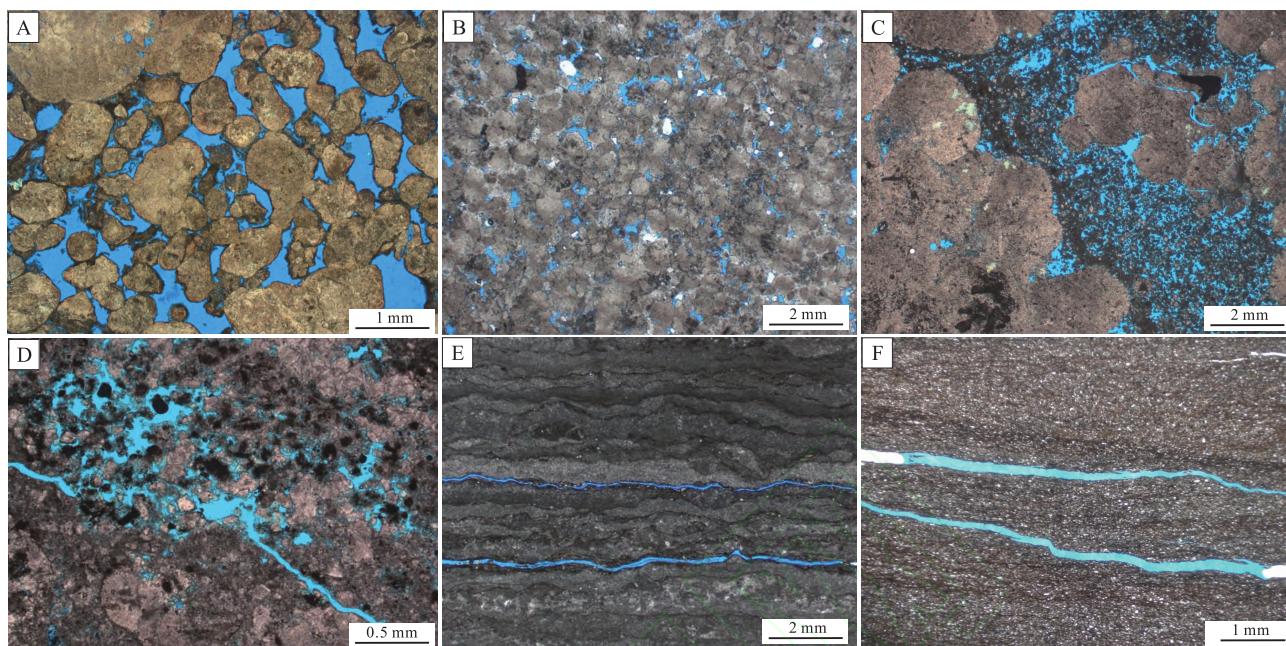
图 3 桑托斯盆地白垩系 BVE 组孔隙度渗透率交会图  
Fig. 3 Cross plot of porosity and permeability of the Cretaceous BVE Formation in Santos Basin

下白垩系 BVE 组湖相碳酸盐岩储集层储集空间多样, 储集性能具有差异, 按形态和大小将研究区内储集空间类型划分为各类孔隙和裂缝, 以储集空间不同组合方式和规模为准则将白垩系 BVE 组储集层具体划分为孔隙型、裂缝-溶孔型和裂缝型三大

类(图 4)。

孔隙型储集层一般是由一系列原生基质孔隙及其溶蚀改造或因短期暴露接受淋滤且在后期未被明显改造的溶蚀孔隙构成的储集层 (Wang *et al.*, 2023)。基底在裂陷期强烈断陷活动影响下, 形成一系列垄—堑相间的构造格局。拗陷期的继承性隆起区古地形较高、水动力强, 主要发育粘结灰岩和颗粒灰岩, 具有较多原生孔隙。由于湖平面的高频升降, 使其不断暴露于湖平面之上, 接收大气水淋滤改造, 形成粒内溶孔、粒间溶孔等孔隙类型。然而巨厚盐岩盖层的强塑性和高热导率, 降低了盐下地层压实程度, 成岩作用减弱, 有利于盐下原生孔隙的保存, 整体上具有相控储集层的特征, 后期成岩作用相对较弱, 孔隙度和渗透率较高, 储集性能较好 (张忠民等, 2020; 何文渊等, 2023)。

裂缝-溶孔型储集层指孔隙和裂缝均发育的储集层, 孔隙为主要储集空间, 裂缝提供部分储集空间的同时, 更重要的作用是连通孤立孔隙以提高渗透率 (Wang *et al.*, 2023)。裂缝-溶孔型储集层的形成受构造断裂和火山热液的共同控制, 断裂不仅控制裂缝的发育, 同时也可作为火山热液进入储集



A—1-Ita-16 井, 5423.35 m, 孔隙型储集层; B—3-BRS-8 井, 5021.5 m, 孔隙型储集层; C—4-Ata-12 井, 5676.25 m, 裂缝-溶孔型储集层; D—4-Aba-97 井, 5415.6 m, 裂缝-溶孔型储集层; E—4-BRS-946 井, 5387 m, 裂缝型储集层; F—4-SPS-6 井, 5599.8 m, 裂缝型储集层

图 4 桑托斯盆地白垩系 BVE 组储集层不同岩心及薄片

Fig. 4 Core and thin section characteristics of different reservoir types of the Cretaceous BVE Formation reservoir in Santos Basin

层的通道, 造成热液矿物溶蚀作用, 形成一系列次生溶蚀孔隙。与单一孔隙型或单一裂缝型储集层相比, 裂缝-溶孔型储集层在岩心上可明显看出孔隙被裂缝沟通, 或孔隙沿裂缝发育, 孔隙和裂缝的共存大大提高了地层的储集、渗流能力, 有助于储集层物性变好, 该类储集层在粘结灰岩和颗粒灰岩层段均有分布。

裂缝型储集层指原生基质孔隙和溶蚀孔均不发育, 储集空间是以具有一定渗流能力的裂缝为主的储集层 (倪国辉等, 2008; 滕团余等, 2009; Wang *et al.*, 2023)。裂缝型储集层的形成主要受构造断裂的控制, 其走向及规模直接影响裂缝型储集层的发育程度, 多发育颗粒灰岩层段。裂缝不仅能够在一定程度上增加储集空间, 还能为孔隙流体和油气运移提供有利通道, 裂缝型储集层只有在厚度和裂缝孔隙度达到一定数值时才可具有工业产能, 硅质成因矿物的填充往往可导致储集层物性变差。

### 3 不同类型储集层测井响应特征

#### 3.1 孔隙型储集层

孔隙型储集层是 BVE 组发育最广泛的一类储

集层, 主要形成于高盐度的浅湖低能沉积环境和高盐度的滨浅湖高能沉积环境。该储集层的储集空间以粒间孔、生物格架孔和溶蚀孔为主, 孔隙呈大面积连片分布, 属典型的中高孔、中高渗的灰岩型储集层。图 5 为研究区孔隙型储集层测井响应图版: 常规测井曲线中自然伽马值较低, 电阻率值因孔隙的出现而明显降低, 阵列感应电阻率差异不明显, 密度值降低, 中子值增大, 指示孔隙度增大。岩心上局部可见针状孔隙, 在电成像测井图像中较易识别, 主要表现为形状不规则的高电导异常体, 孔隙型储集层整体呈颜色较深的团块状, 能够观察到的孔隙形态一般为星点状和串珠状的暗色斑点, 且孔隙边缘比较模糊。

#### 3.2 裂缝-溶孔型储集层

裂缝-溶孔型储集层的储集空间类型包括孔隙和裂缝, 其中孔隙主要为次生孔隙, 裂缝对储集层的孔隙度和渗透率都起到积极影响, 但更为重要的是作为渗流的渠道。该储集层同时具有孔隙型、裂缝型储集层的特征, 综合了裂缝型储集层的电阻率响应特征的同时也具有孔隙型储集层在密度、中子

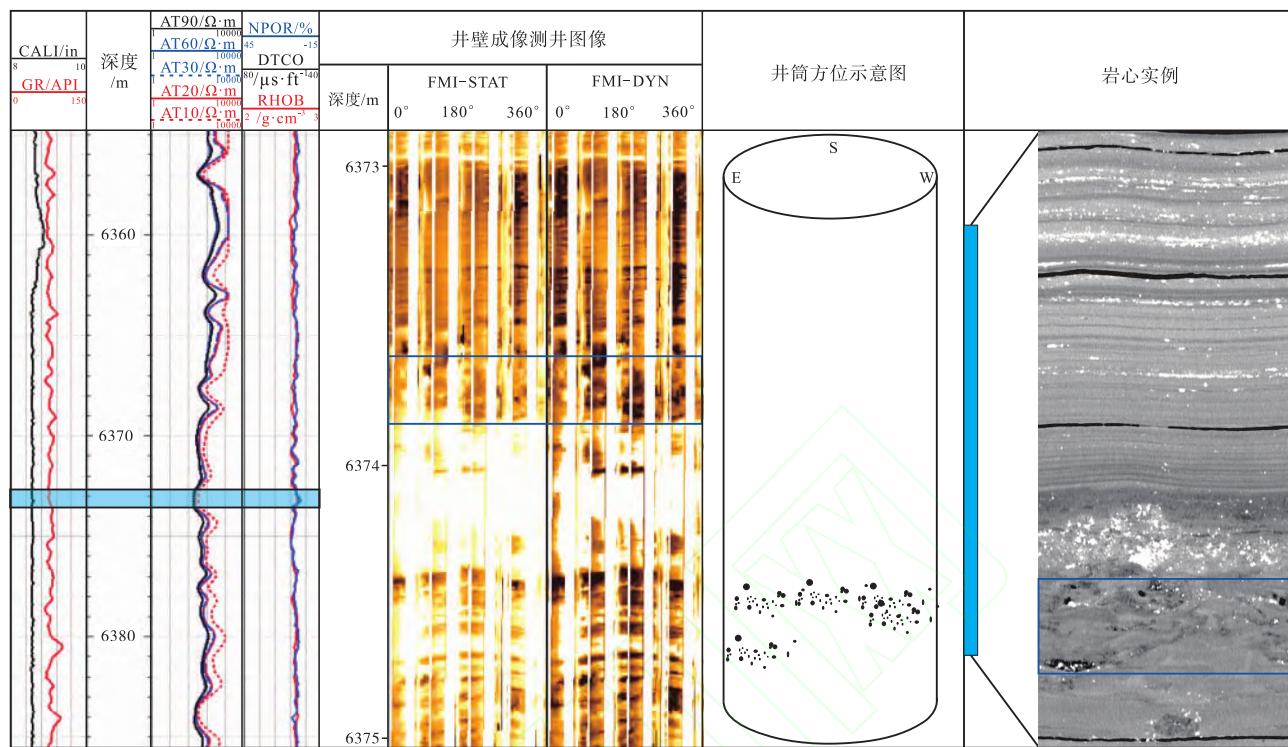


图 5 桑托斯盆地白垩系 BVE 组孔隙型储集层测井响应图版

Fig. 5 Logging response characteristics of porosity reservoir of the Cretaceous BVE Formation in Santos Basin

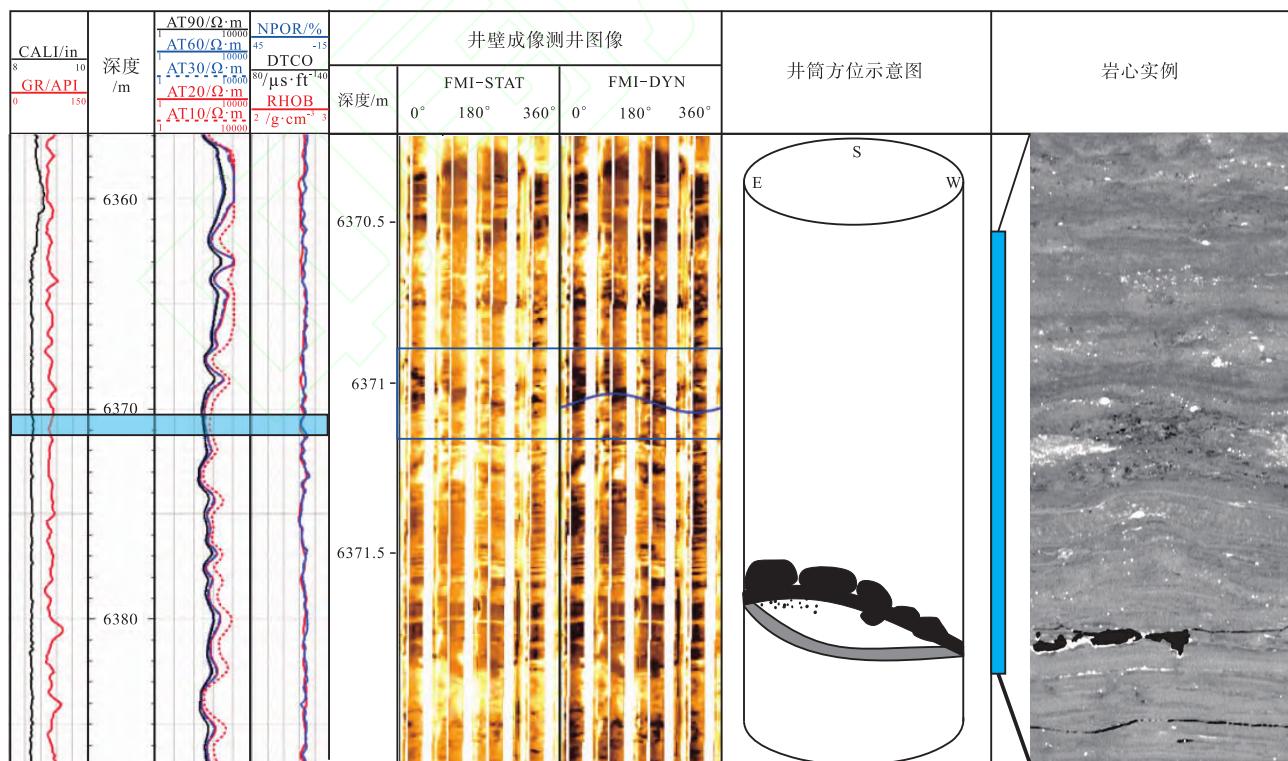


图 6 桑托斯盆地白垩系 BVE 组裂缝-溶孔型储集层测井响应图版

Fig. 6 Logging response characteristics of fracture-pore reservoir of the Cretaceous BVE Formation in Santos Basin

测井曲线上的反映, 所以, 在常规和电成像测井资料上有比上述 2 类储集层更加明显的电测异常特点。从常规曲线可以看出: 自然伽马表现为低值, 井径曲线略微扩大; 阵列感应电阻率降低明显且具有幅度差, 指示了裂缝的产状和发育状况; 孔隙度曲线表现为密度减小、中子增大的趋势, 反映了孔隙较为发育。在电成像测井图中, 张开裂缝表现为连续或间断的深色条带, 其形状由裂缝产状决定, 可明显看出线状模式与斑状模式同时出现, 孔隙有沿裂缝发育的现象(图 6)。

### 3.3 裂缝型储集层

目前碳酸盐岩储集层裂缝测井识别与评价已经形成完善的解释方法流程(邓少贵等, 2006; 滕团余等, 2009; 赖锦等, 2015)。研究区裂缝型储集层发育较少, 储集空间以边缘平直的低角度构造缝和溶蚀缝为主。桑托斯盆地盐下区块勘探井的钻井液类型以油基钻井液为主, 电成像测井可精准、

高效地拾取高角度裂缝, 但在识别低角度缝时存在一定难度, 需重点结合声波时差测井以提高储集层裂缝的识别。从常规测井响应上看(图 7), 该区裂缝发育段伽马值一般在低—中值变化, 阵列感应电阻率降低、且表现为负差异, 阵列感应电阻率间的差异会随着碳酸盐岩裂缝倾角的增大而增大, 声波时差呈明显增大的趋势。裂缝发育处的电阻率或声阻抗与围岩存在差异是成像测井识别裂缝的主要依据: 钻井过程钻遇井壁裂缝发育段时, 裂缝的电阻率会随着钻井液的侵入明显低于围岩, 使电成像显示出低阻的暗色条纹。值得注意的是, 当油基钻井液侵入到开启裂缝时, 电成像测井表现为连续或不连续亮色正弦曲线的高阻裂缝特征。

## 4 实例应用

以前文总结的测井响应特征为依据, 对桑托斯盆地白垩系 BVE 组进行单井的储集层测井识别与

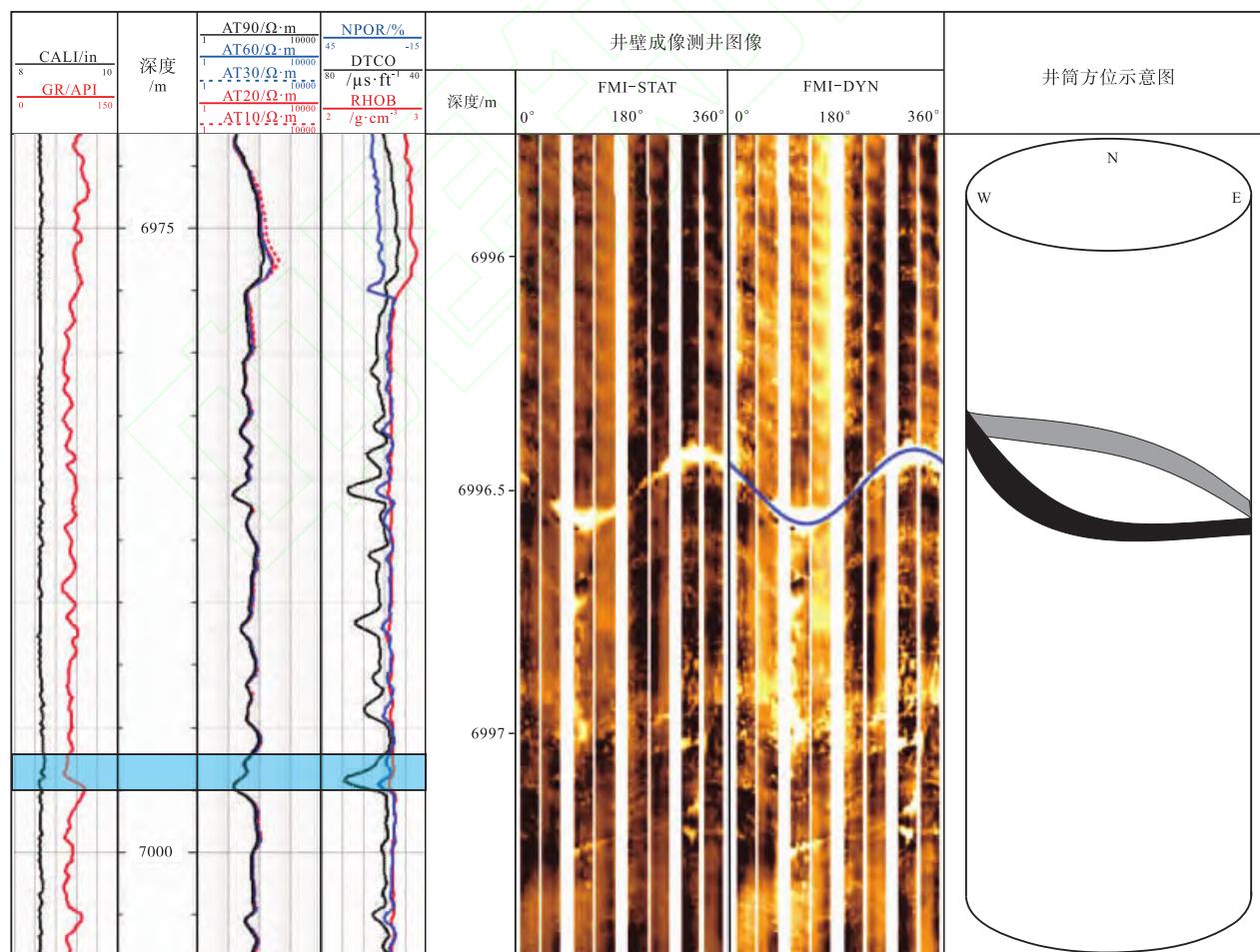


图 7 桑托斯盆地白垩系 BVE 组裂缝型储集层测井响应图版

Fig. 7 Logging response characteristics of fractured reservoir of the Cretaceous BVE Formation in Santos Basin

划分。对 1-SPS-1 井从 6307.35 ~ 6475 m 井段共 167.65 m 的碳酸盐岩进行识别与划分, 发现此井发育 3 种类型储集层, 即孔隙型、裂缝-溶孔型和裂缝型; 其中孔隙型储集层 50.09 m, 裂缝-孔隙型储集层 26.71 m 和裂缝型储集层 4.49 m (图 8)。核磁共振数据可以显示常规测井无法检测到的孔隙

体积分布变化, 并提供不受矿物学影响的孔隙度测量 (Al-Marzouqi *et al.*, 2010; de Castro and Lupiacci, 2022), 一定程度上降低了测井解释的多解性。T2 截止值反映了可流动体与束缚流体的弛豫时间界限, 是核磁共振测量中的重要参数, 对于研究区域的分析, 最终选择了传统的 T2 截止值

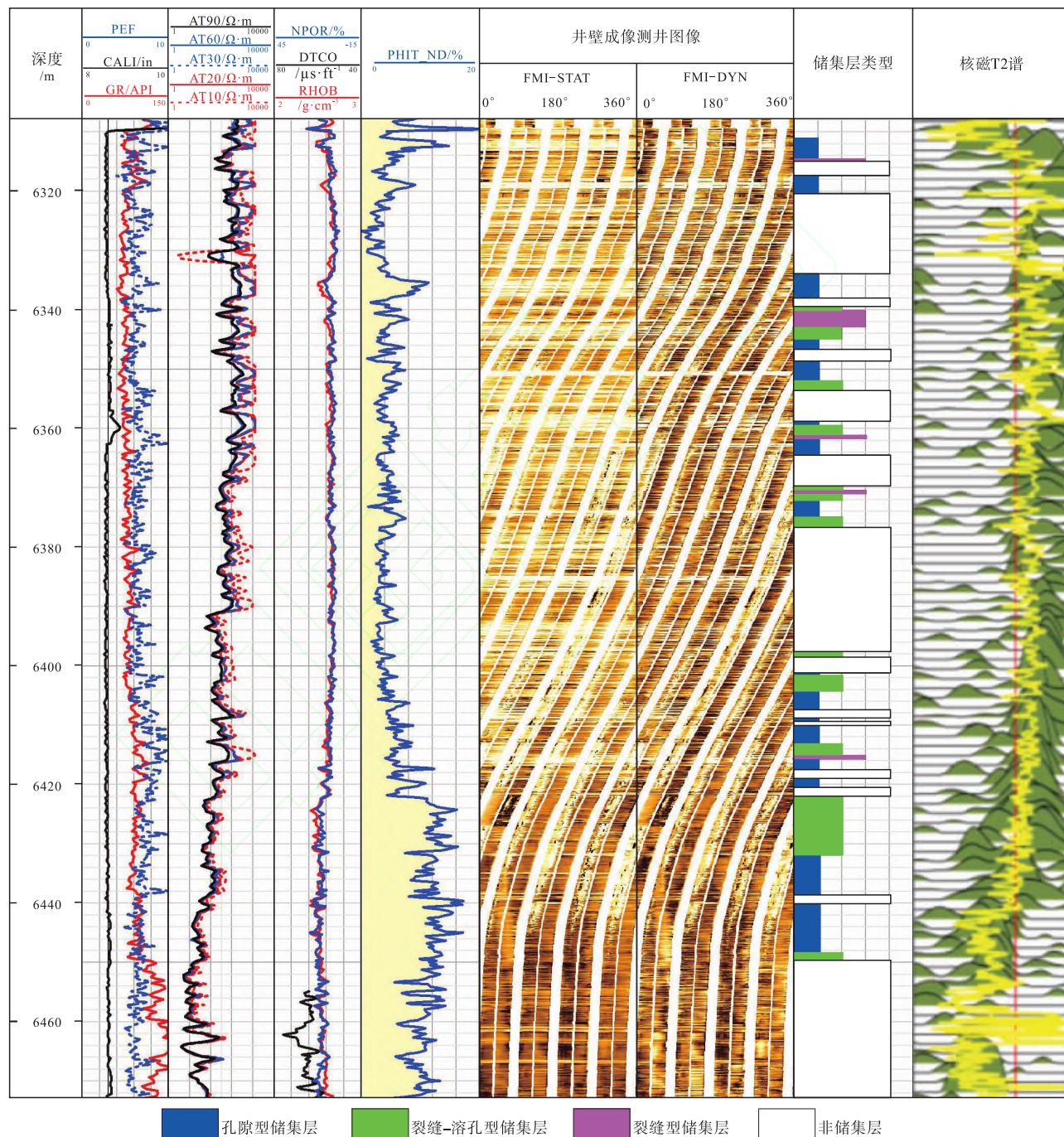


图 8 桑托斯盆地白垩系 BVE 组 1-SPS-1 井单井储集层类型识别综合剖面图

Fig. 8 Well logging reservoir type identification comprehensive profile of Well 1-SPS-1

of the Cretaceous BVE Formation in Santos Basin

100 ms。标准 T2 谱主要以单峰或双峰形态，分布在 T2 截止值右侧显示为较大孔隙，谱峰越高代表大孔隙越多，若出现“拖尾”现象则指示为油层，该井的储集层类型划分结果与试油结果匹配良好。根据单井储集层类型划分的结果，桑托斯盆地白垩系 BVE 组主要发育孔隙型储集层，实际试油资料表明孔隙型和裂缝-溶孔型储集层的原油产量贡献高达 90% 以上，是研究区的有利储集层。

碳酸盐岩储集层的储集空间复杂，一般由原生孔隙、次生孔隙和裂缝共同组成，与常规测井技术相比，电成像测井的动、静态图像不仅具有较高的分辨率，并且能对井壁表面地层的精细地质结构进行很好的揭示，明显反映出每种岩性中的次生构造（如裂缝、孔洞、方解石充填缝等），建立不同储集空间的测井相模式。除此以外，岩心上难以分辨的地质现象可以在电成像测井图像上清晰地反映，对储集层研究极具重要作用。总体而言，泥晶灰岩基本无储集空间，往往不易形成储集层，三类储集层在粘结灰岩和颗粒灰岩层段均有发育，但以孔隙型储集层为主。因此，“常规+成像+岩心+地质模式”的储集层类型测井识别图版的建立，可有效识别与划分桑托斯盆地白垩系 BVE 组储集层类型，为碳酸盐岩储集层的精细评价和优质储集层预测提供指导。

## 5 结论

1) 桑托斯盆地盐下区块发育湖相碳酸盐岩，孔隙度、渗透率属中—高值，二者呈正相关。岩心和薄片鉴定结果表明白垩系 BVE 组的储集空间主要为粒间孔、溶蚀孔和裂缝，根据储集空间不同形态的组合特征将储集层划分为孔隙型、裂缝-溶孔型和裂缝型 3 类储集层。

2) 利用常规测井结合电成像测井可以有效识别与划分复杂湖相碳酸盐岩的储集层类型，孔隙型储集层和裂缝型储集层在成像上分别呈暗色斑状模式和线状模式，裂缝-孔隙型储集层综合二者的成像特征，且中子、密度和声波测井发生明显变化。

3) 在桑托斯盆地盐下区块白垩系 BVE 组主要发育孔隙型储集层，利用高分辨率电成像测井实现了碳酸盐岩储集层类型的连续识别和划分，为碳酸盐岩储集层的精细评价和优质储集层预测提供指导。

## 参考文献 (References)

- 陈芳, 李淑荣, 袁卫国, 许东晖, 夏宁. 2010. 利用 FMI 成像测井资料综合评价川东北多相带碳酸盐岩储层. 测井技术, 34(4): 343-347. [Chen F, Li S R, Yuan W G, Xu D H, Xia N. 2010. Comprehensive evaluation of carbonate reservoir with multi facies using FMI imaging logging data in Northeast Sichuan. Well Logging Technology, 34(4): 343-347]
- 邓超, 白国平, 仲米虹, 邹建红, 刘君兰, 张明辉. 2014. 巴西桑托斯盆地含油气系统划分与评价. 海相油气地质, 19(3): 35-42. [Deng C, Bai G P, Zhong M H, Zou J H, Liu J L, Zhang M H. 2014. Division and evaluation of petroleum systems in the Santos Basin, Brazil. Marine Origin Petroleum Geology, 19(3): 35-42]
- 邓少贵, 王晓畅, 范宜仁. 2006. 裂缝性碳酸盐岩裂缝的双侧向测井响应特征及解释方法. 地球科学, 31(6): 846-850. [Deng S G, Wang X C, Fan Y R. 2006. Response of dual laterolog to fractures in fractured carbonate formation and its interpretation. Earth Science, 31(6): 846-850]
- 范嘉松. 2005. 世界碳酸盐岩油气田的储层特征及其成藏的主要控制因素. 地学前缘, 12(3): 23-30. [Fan J S. 2005. Characteristics of carbonate reservoirs for oil and gas fields in the world and essential controlling factors for their formation. Earth Science Frontiers, 12(3): 23-30]
- 何娟, 何登发, 李顺利, 张光亚. 2011. 南大西洋被动大陆边缘盆地大油气田形成条件与分布规律: 以巴西桑托斯盆地为例. 中国石油勘探, 16(3): 57-67, 8. [He J, He D F, Li S L, Zhang G Y. 2011. Formation and distribution of giant oil and gas fields in Passive continental margin of South Atlantic Ocean: a case study of Santos Basin in Brazil. China Petroleum Exploration, 16(3): 57-67, 8]
- 何文渊, 史卜庆, 范国章, 汪望泉, 王红平, 王景春, 左国平, 王朝锋, 杨柳. 2023. 巴西桑托斯盆地深水大油田勘探实践与理论技术进展. 石油勘探与开发, 50(2): 227-237. [He W Y, Shi B Q, Fan G Z, Wang W Q, Wang H P, Wang J C, Zuo G P, Wang C F, Yang L. 2023. Theoretical and technical progress in exploration practice of the deep-water large oil fields, Santos Basin, Brazil. Petroleum Exploration and Development, 50(2): 227-237]
- 贾怀存, 康洪全, 梁建设, 程涛, 张世鑫. 2021. 桑托斯盆地湖相碳酸盐岩储层特征及控制因素. 西南石油大学学报(自然科学版), 43(2): 1-9. [Jia H C, Kang H Q, Liang J S, Cheng T, Zhang S X. 2021. Characteristic and developmental controlled factors of pre-salt lacustrine carbonate, Santos Basin. Journal of Southwest Petroleum University(Science & Technology Edition), 43(2): 1-9]
- 金振奎, 石良, 高白水, 余宽宏. 2013. 碳酸盐岩沉积相及相模式. 沉积学报, 31(6): 965-979. [Jin Z K, Shi L, Gao B S, Yu K H. Carbonate facies and facies models. Acta Sedimentologica Sinica, 31(6): 965-979]

- 景建恩, 魏文博, 梅忠武, 李舟波. 2005. 裂缝型碳酸盐岩储层测井评价方法: 以塔河油田为例. 地球物理学进展, 20(1): 78-82. [ Jing J E, Wei W B, Mei Z W, Li Z B. 2005. Method of well-logging interpretation for fracture reservoirs of carbonate rock: a case study in Tahe oil-field. *Progress in Geophysics*, 20(1): 78-82 ]
- 康洪全, 贾怀存, 程涛, 王健, 孟金落. 2018a. 南大西洋两岸含盐盆地裂谷层序油气地质特征与油气分布特征对比. 地质科技情报, 37(4): 113-119. [ Kang H Q, Jia H C, Cheng T, Wang J, Meng J L. 2018a. Comparison of petroleum geology and hydrocarbon accumulation of rift sequence in the salt basins on both sides of South Atlantic Ocean. *Bulletin of Geological Science and Technology*, 37(4): 113-119 ]
- 康洪全, 吕杰, 程涛, 贾怀存, 白博. 2018b. 巴西桑托斯盆地盐下湖相碳酸盐岩储层特征. 海洋地质与第四纪地质, 38(4): 170-178. [ Kang H Q, LV J, Cheng T, Jia H C, Bai B. 2018b. Characters of pre-salt lacustrine carbonate reservoir, Santos Basin, Brazil. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 38(4): 170-178 ]
- 赖锦, 王贵文, 郑新华, 周磊, 肖承文, 章成广, 王凯, 韩闯. 2015. 油基泥浆微电阻率扫描成像测井裂缝识别与评价方法. 油气地质与采收率, 22(6): 47-54. [ Lai J, Wang G W, Zheng X H, Zhou L, Xiao C W, Zhang C G, Wang K, Han C. 2015. Recognition and evaluation method of fractures by micro-resistivity image logging in oil-based mud. *Petroleum Geology and Recovery Efficiency*, 22(6): 47-54 ]
- 刘震, 张军华, 王静, 于正军, 苏朝光. 2022. 湖相碳酸盐岩研究进展及展望. 石油地球物理勘探, 57(2): 487-497, 250. [ Liu Z, Zhang J H, Wang J, Yu Z J, Su C G. 2022. Review and prospect of research on lacustrine carbonate rocks. *Oil Geophysical Prospecting*, 57(2): 487-497, 250 ]
- 倪国辉, 徐剑波, 宫清顺, 康晓泉, 李光辉. 2008. 中东 T 油田碳酸盐岩储层测井评价. 石油学报, 29(6): 853-858. [ Ni G H, Xu J B, Gong Q S, Kang X Q, Li G H. 2008. Logging evaluation of carbonate reservoirs in T Oilfield of Middle East. *Acta Petrolei Sinica*, 29(6): 853-858 ]
- 苏玲, 朱如凯, 崔景伟, 吴松涛, 罗忠, 毛治国, 李森. 2017. 中国湖相碳酸盐岩时空分布与碳氧同位素特征. 古地理学报, 19(6): 1063-1074. [ Su L, Zhu R K, Cui J W, Wu S T, Luo Z, Mao Z G, Li S. 2017. Spatial-temporal distribution of lacustrine carbonate rocks in China and their carbon and oxygen isotopic characteristics. *Journal of Palaeogeography (Chinese Edition)*, 19(6): 1063-1074 ]
- 腾团余, 崔海峰, 张年春, 曾朝燕. 2009. 碳酸盐岩裂缝型储层地震预测技术: 以牙哈地区为例. 天然气地球科学, 20(2): 269-272. [ Teng T Y, Cui H F, Zhang N C, Zeng Z Y. 2009. Prediction of fractured carbonate reservoirs using seismic data: an example of Yaha area in Tarim oilfield. *Natural Gas Geoscience*, 20(2): 269-272 ]
- 汪新伟, 邬长武, 郭永强, 孟庆强, 张云霞, 陶治. 2013. 巴西桑托斯盆地卢拉油田成藏特征及对盐下勘探的启迪. 中国石油勘探, 18(3): 61-69. [ Wang X W, Wu C W, Guo Y Q, Meng Q Q, Zhang Y X, Tao Y. 2013. Accumulation feature of Lula oilfield and Its exploratory implication for pre-salt reservoirs in Santos Basin, Brazil. *China Petroleum Exploration*, 18(3): 61-69 ]
- 熊利平, 邬长武, 郭永强, 李嵩阳. 2013. 巴西海上坎波斯与桑托斯盆地油气成藏特征对比研究. 石油实验地质, 35(4): 419-425. [ Xiong L P, Wu C W, Guo Y Q, Li S Y. 2013. Petroleum accumulation characteristics in Campos and Santos Basins, offshore Brazil. *Petroleum Geology & Experiment*, 35(4): 419-425 ]
- 徐敬领, 王亚静, 曹光伟, 秦宇星. 2012. 碳酸盐岩储层测井评价方法. 现代地质, 26(6): 1265-1274. [ Xu J L, Wang Y J, Cao G W, Qin Y X. 2012. Well-logging evaluation methods on carbonate reservoirs. *Geoscience*, 26(6): 1265-1274 ]
- 武静, 赵鹏飞, 王晖, 王亚青, 李敬功. 2019. 巴西桑托斯盆地 A 区块 Barra Velha 组古地貌及其对储层的控制. 海洋地质前沿, 35(1): 53-59. [ Wu J, Zhao P F, Wang H, Wang Y Q, Li J G. 2019. Paleogeomorphology of the Barra Velha Formation in block A of the Santos basin, Brazil, and its control over reservoirs. *Marine Geology Frontiers*, 35(1): 53-59 ]
- 徐星, 赵万优. 2001. Star-II 成像测井在碳酸盐岩储层评价中的应用. 测井技术, 25(5): 358-364, 399. [ Xu X, Zhao W Y. 2001. Application of Star-II imaging logging in carbonate reservoir evaluation. *Well Logging Technology*, 25(5): 358-364, 399 ]
- 赵永刚, 李功强, 宋立志, 孙延飞. 2008. 大牛地气田碳酸盐岩储层类型测井判别及应用. 天然气工业, 28(12): 44-47, 138. [ Zhao Y G, Li G Q, Song L Z, Sun Y F. 2008. Application of logging data in identifying carbonate reservoir types in the Daniudi gas field. *Natural Gas Industry*, 28(12): 44-47, 138 ]
- 张忠民, 朱奕璇, 张德民, 苏玉山, 姚威, 鲍志东, 宋健, 沈卫宏. 2020. 巴西大坎波斯盆地盐下碳酸盐岩油气成藏规律与勘探启示. 中国石油勘探, 25(4): 75-85. [ Zhang Z M, Zhu Y X, Zhang D M, Su Y S, Yao W, Bao Z D, Song J, Shen W H. 2020. Hydrocarbon accumulation rules and exploration inspiration of pre-salt carbonate reservoirs in the Great Campos Basin, Brazil. *China Petroleum Exploration*, 25(4): 75-85 ]
- Al-Marzouqi M I, Budebes S, Sultan E, Bush I. 2010. Resolving carbonate complexity. *Oilfield Review*, 22(2): 40-55.
- de Andrade Neves I, Lupinacci W M, Ferreira D J A, Zambrini J P R, Oliveira L O A, Olho Azul M, Ferrari A L, Gamboa L A P. 2019. Pre-salt reservoirs of the Santos Basin: Cyclicity, electrofacies, and tectonic-sedimentary evolution. *Interpretation*, 7(4): SH33-SH43.
- de Castro T M, Lupinacci W M. 2022. Comparison between conventional and NMR approaches for formation evaluation of presalt interval in the Buzios Field, Santos Basin, Brazil. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 208: 109679.
- de Paula Faria D L, dos Reis A T, de Souza Jr O G. 2017. Three-dimensional stratigraphic-sedimentological forward modeling of an Aptian

- carbonate reservoir deposited during the sag stage in the Santos basin, Brazil. *Marine and Petroleum Geology*, 88: 676–695.
- Herlinger R Jr, Zambonato E E, De Ros L F. 2017. Influence of diagenesis on the quality of lower Cretaceous pre-salt lacustrine carbonate reservoirs from northern Campos Basin, offshore Brazil. *Journal of Sedimentary Research*, 87: 1285–1313.
- Kattah S. 2017. Exploration opportunities in the pre-salt play, deepwater Campos Basin, Brazil. *The Sedimentary Record*, 15(1): 4–8.
- Meisling K E, Cobbold P R, Mount V S. 2001. Segmentation of an obliquely rifted margin, Campos and Santos Basins, southeastern Brazil. *AAPG Bulletin*, 85(11): 1903–1924.
- Qin Y X. 2012. Well-logging evaluation methods on carbonate reservoirs. *Geoscience*, 26(6): 1265–1274.
- Quirk D G, Hertle M, Jeppesen J W, Raven M, Mohriak W U, Kann D J, Nørgaard M, Howe M J, Hsu D, Coffey B, Mendes M P. 2013. Rifting, subsidence and continental break-up above a mantle plume in the central South Atlantic. *Geological Society, London, Special Publications*, 369(1): 185–214.
- Vasquez G F, Morschbacher M J, dos Anjos C W D, Silva Y M P, Madruchi V, Justen J C R. 2019. Petroacoustics and composition of presalt rocks from Santos Basin. *The Leading Edge*, 38(5): 342–348.
- Wang H P, Zhang M, Fan G Z, Xiao L, Zuo G P, Yang L, Pang X, Wang C F, Zhang Y G. 2023. Prediction of lithology in lacustrine carbonates using well logs: The Cretaceous *Barra Velha* Formation in Santos Basin, offshore Brazil. *Geological Journal*, 58(11): 4271–4282.

(责任编辑 郑秀娟)